



# AstroParticelle

[www.astroparticelle.it](http://www.astroparticelle.it)

## I RAGGI COSMICI



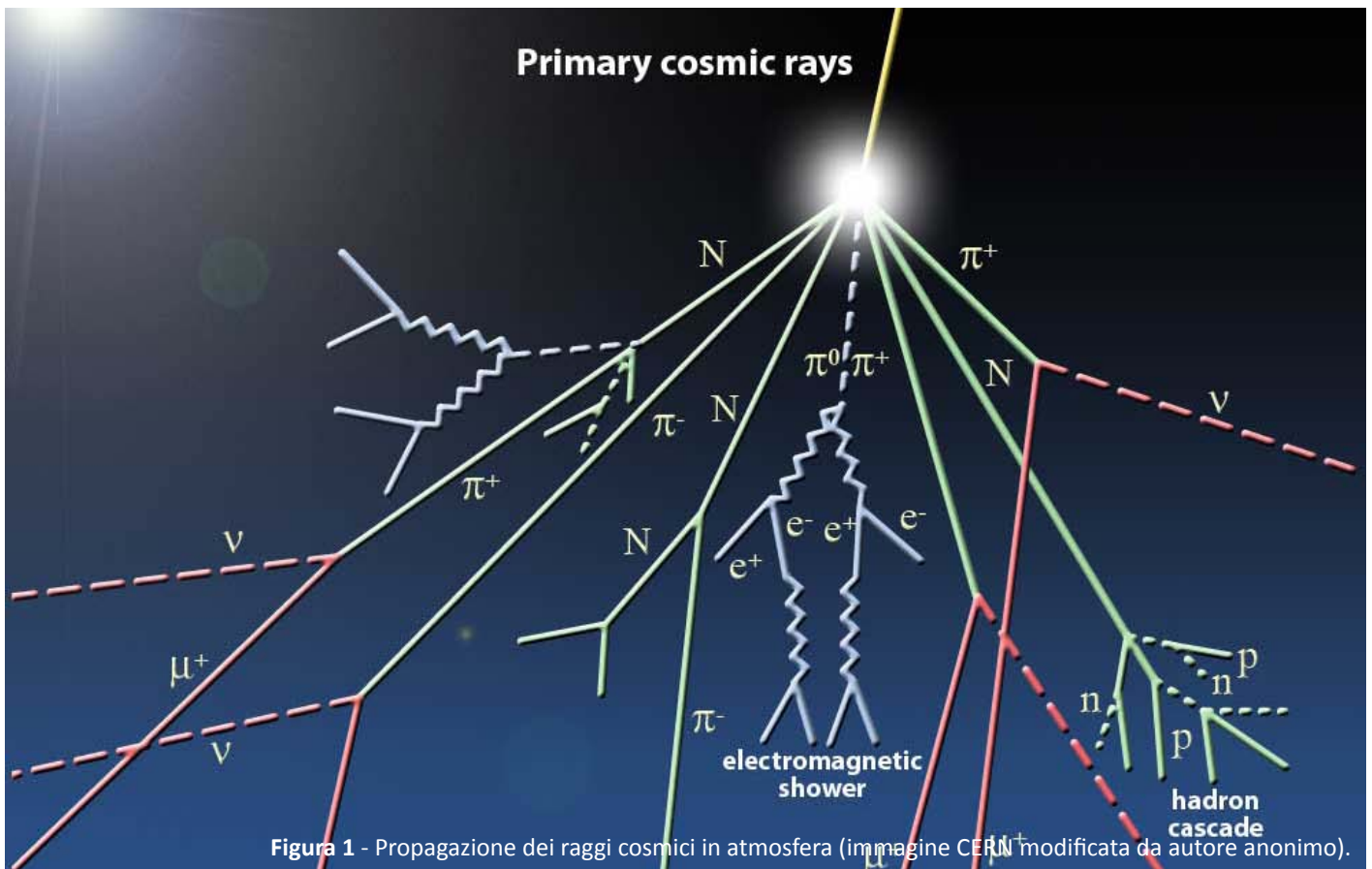


Figura 1 - Propagazione dei raggi cosmici in atmosfera (immagine CERN modificata da autore anonimo).

## L'EFFETTO EST-OVEST

di Marco Arcani

Le *astroparticelle* o raggi cosmici, sono particelle sub-nucleari emesse ed accelerate da diverse sorgenti nel cosmo; i campi magnetici dei corpi celesti come le stelle e molti pianeti agiscono sulle particelle elettricamente cariche deviandone la loro traiettoria. L'effetto del campo magnetico terrestre sulle particelle fu inizialmente indagato da Carl Stormer che studiava le aurore polari. In seguito Jacob Clay, Robert Millikan e Arthur Compton indipendentemente fecero diverse spedizioni per cercare di comprendere la natura dei raggi cosmici. In particolare Compton all'inizio degli anni trenta dimostrò che i raggi cosmici dovevano essere particelle dotate di carica elettrica. Con lo scopo di capire se la carica elettrica fosse positiva o negativa, Bruno Rossi ipotizzò che misurando la radiazione tramite contatori Geiger puntati verso il cielo come un telescopio, si poteva capire il tipo di carica delle particelle. Con una serie di strumenti amatoriali abbiamo ripetuto lo storico esperimento di Rossi ottenendo risultati molto interessanti.

### ■ Raggi cosmici primari e secondari

Il flusso dei raggi cosmici *primari* è costituito prevalentemente da protoni e nuclei atomici (ioni) che sono particelle con carica elettrica positiva. Essi provengono prevalentemente da sorgenti celesti come le supernove i resti di supernove, buchi neri e altri eventi esplosivi come l'unione di stelle di neutroni. Tutte le particelle cariche come i protoni sono deviate dai campi magnetici, quindi immediatamente dopo la loro creazione il tragitto che percorrono segue un movimento a spirale dovuto al campo magnetico galattico; in prossimità di campi magneti intensi, la curvatura della spirale aumenta (a seconda dell'ener-

gia della particella). Le particelle *primarie* (protoni e ioni<sup>+</sup>) appena entrano nel campo d'azione del dipolo magnetico terrestre sono costretti a seguire una traiettoria da Ovest verso Est (vedi paragrafo seguente). Esse entrando in atmosfera collidono con gli atomi dell'atmosfera stessa (figura 1) causando una grande esplosione energetica con produzione di numerose altre particelle, chiamate *secondarie* e di diversa natura, tra cui compaiono mesoni, barioni, muoni, elettroni e fotoni gamma.

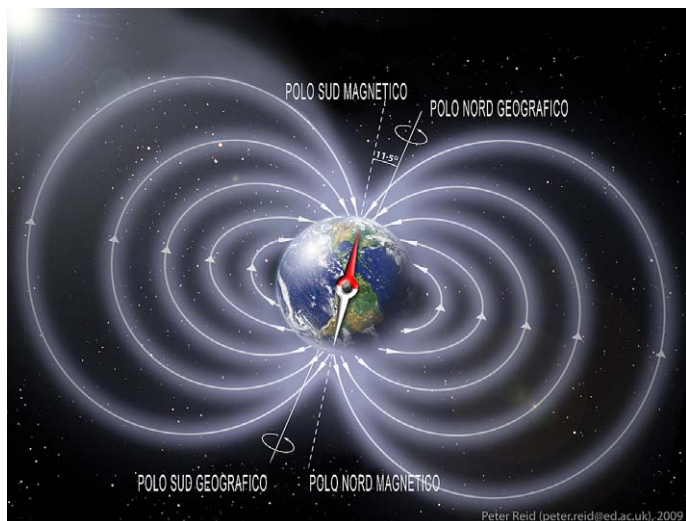
Le particelle secondarie generate nelle interazioni (decadimento, spallazione e scattering) con gli atomi dell'atmosfera, tendenzialmente conservano il vettore della quantità di moto (a seconda del tipo di

interazione), quindi misurando la direzione di provenienza delle particelle secondarie si ha indicazione della direzione di provenienza di quelle primarie. In particolare la particella (elettricamente carica) più abbondante nel flusso dei raggi cosmici secondari e che si propaga fino a livello del mare è il muone ed è quella che viene misurata dalla maggior parte dei rivelatori a terra.

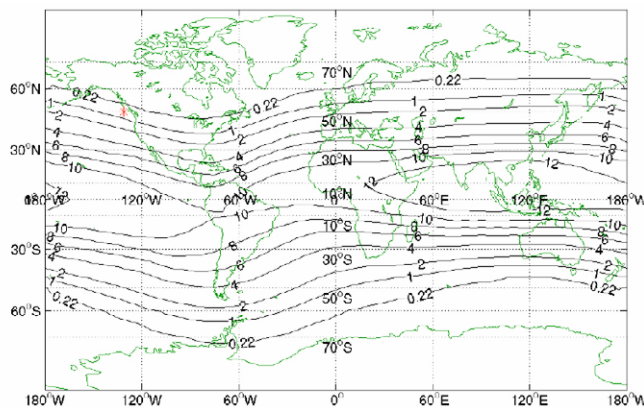
### ■ Effetto geomagnetico

La Terra è come un grosso magnete con il polo nord magnetico in prossimità del polo sud geografico e il polo sud magnetico quasi in corrispondenza del polo nord geografico; le particelle cariche che si muovono in un campo magnetico vengono deviate dalla forza di Lorentz applicata all'elettromagnetismo di Maxwell (vedi box nella pagina seguente).

Questo produce un effetto di sbarramento nella zona equatoriale, dove le linee di campo magnetico sono praticamente parallele alla superficie terrestre (figura 2) e quindi le particelle vengono limitate. Mentre ai poli dove le linee di campo sono praticamente perpendicolari alla superficie (parallele alla direzione di moto delle particelle), lo sbarramento è nullo. Questo è anche il motivo per cui le aurore sono visibili solamente nelle zone circumpolari. Il fatto che l'asse del campo magnetico sia di 11 gradi disallineato dall'asse di rotazione terrestre produce delle zone variabili nel flusso dei raggi cosmici che sono delimitate da linee chiamate isocosme (figura 3) in cui a latitudini differenti la radiazione cosmica è equivalente. Da tenere presente che il campo magnetico non blocca affatto le particelle di alta energia (o rigidità magnetica) che sono più pericolose (ma fortunatamente sono anche più rare); mentre riduce l'intensità di quelle a bassa energia, infatti solo particelle sopra ad una certa so-



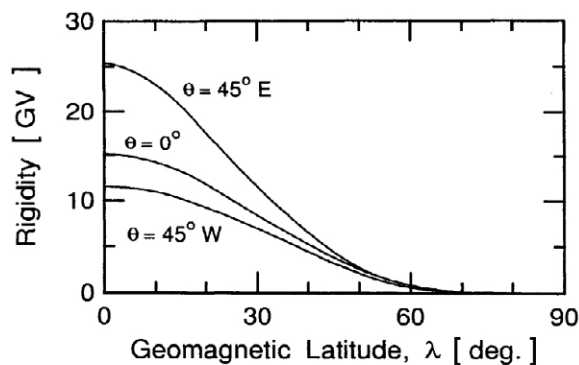
**Figura 2** - Il campo magnetico terrestre (fonte immagine: Peter Reid, modificata dall'autore).



**Figura 3** - Distribuzione verticale delle particelle in funzione della latitudine per diversa rigidità magnetica. La rigidità magnetica è la forza che la particelle oppone al campo magnetico che tende a deviarla ed è direttamente proporzionale all'energia della particella (fonte immagine: J. Mertens [3]).

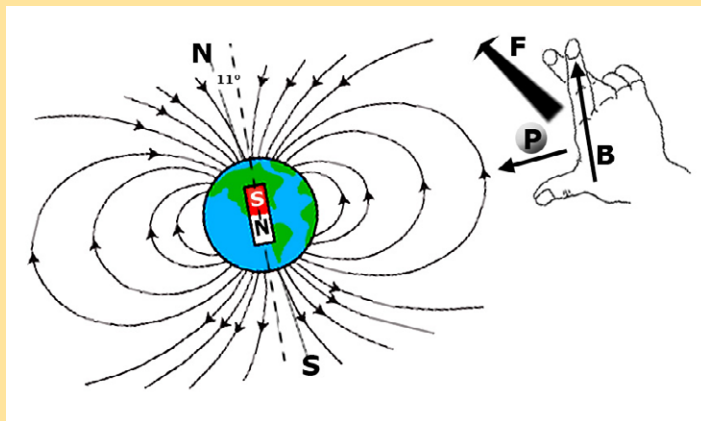
glia di energia possono penetrare all'equatore, quelle di energia inferiore vengono respinte o deviate. La soglia all'equatore per i protoni primari è di circa 15 GeV. In conclusione l'intensità dei raggi cosmici aumenta dall'equatore verso i poli con una variazione del 15-30% a seconda della latitudine e questo fenomeno è chiamato appunto *effetto latitudine* (figura 4).

All'inizio degli anni trenta non si era ancora sicuri della natura dei raggi cosmici, i fisici erano schierati su due linee di pensiero; quelli che pensavano ai raggi cosmici come a una specie di radiazione gamma ma più penetrante (quindi particelle neutre) e quelli persuasi del fatto che i raggi cosmici dovevano essere particelle elettricamente cariche. Bruno Rossi faceva parte del secondo gruppo e aveva ipotizzato che se le particelle fossero state dotate di una specifica carica elettrica, si doveva trovare un'asimmetria tra il flusso di quelle provenienti da est rispetto a quelle provenienti da ovest e oltretutto sarebbe stato possibile determinare il tipo di carica elettrica. Però per



**Figura 4** - Variazione dell'energia in funzione della latitudine. Le linee del grafico considerano anche particelle incidenti con angolo di zenit ( $\theta$ ) differente. (fonte immagine: Rossi e Olbert 1970 in accordo con i dati di Störmer [5])

**La regola della mano destra** nell'elettromagnetismo stabilisce il comportamento delle forze generate tra corrente elettrica e flusso magnetico, che vale anche per i raggi cosmici carichi. Pollice indice e medio devono formare un angolo di  $90^\circ$  tra di loro, l'indice è il verso di propagazione del flusso magnetico 'B', il pollice la direzione della carica elettrica positiva 'P' (i protoni), il medio è la forza risultante 'F'. Considerando un protone in direzione radiale verso la Terra, si vede che esso incontra all'equatore le linee di flusso magnetico perpendicolarmente e quindi subisce la massima deviazione possibile verso est. Lo stesso protone non subisce deviazioni ai poli, dove le linee di flusso sono parallele. Per cariche elettriche negative è il contrario (si può usare la mano sinistra)[2].



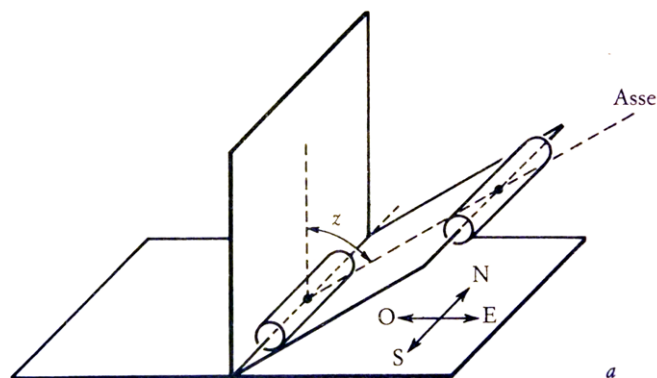
via dell'effetto di latitudine, dall'Italia non riuscì a dimostrare la sua ipotesi. La prima conferma venne da Thomas H. Johnson, Luis Alvarez e Compton da Città del Messico. In seguito Rossi durante una spedizione in Eritrea misurò un'asimmetria del 26% con prevalenza di particelle cariche provenienti da Ovest [1]. Fu la conferma della sua tesi e una ulteriore dimostrazione del fatto che i raggi cosmici dovevano essere principalmente particelle cariche e con carica elettrica positiva. Da notare che in quegli anni non era ancora ben conosciuta la distribuzione degli sciami in atmosfera per cui si immaginava di misurare direttamente le particelle primarie.

### ■ Il telescopio per raggi cosmici di Rossi



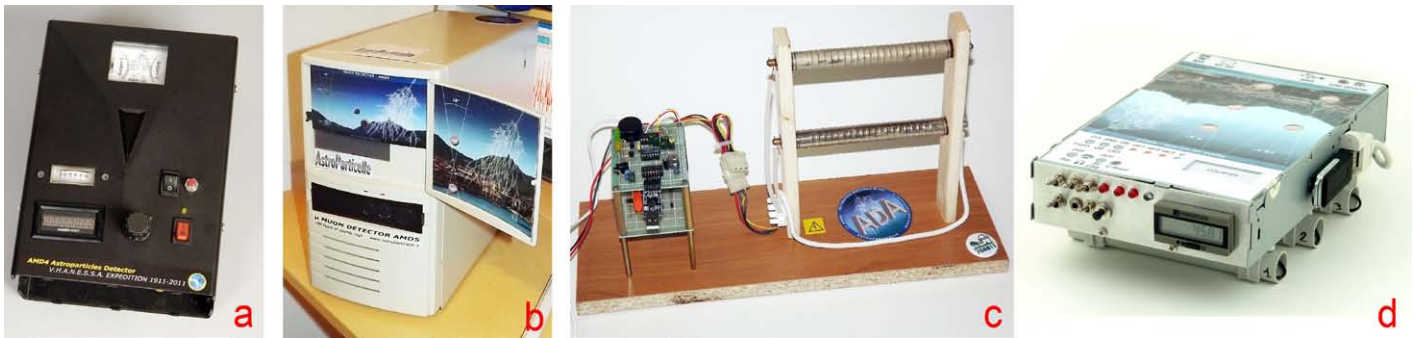
**Figura 5** - Il telescopio per raggi cosmici di Bruno Rossi conservato all'Università di Padova (immagine dell'autore).

Bruno Rossi fece costruire un apparato (figura 5) dove poteva montare fino a 3 tubi di Geiger-Müller (GMT) configurati in modo coincidente. Lo strumento forniva un segnale in uscita tramite un circuito elettronico solo se la particella avesse attraversato tutti i (due o tre) tubi. Questo sistema di coincidenze è tuttora utilizzato in quasi qualsiasi rivelatore di raggi cosmici per discriminare le particelle prodotte dalla radioattività naturale da quelle prodotte in atmosfera dai raggi cosmici. Infatti le astroparticelle hanno energie di diversi ordini di grandezza superiori rispetto alle particelle prodotte da decadimento radioattivo e queste ultime difficilmente riescono ad attraversare tutti i GMT senza decadere. Bruno Rossi è anche noto per essere stato il primo ad ideare un circuito elettronico (ai tempi composto da tubi termoionici) per collegare tre o più tubi in coincidenza. L'apparato era montato su una specie di forcella orientabile sia sul piano orizzontale che sull'inclinazione (come in una montatura altazimutale per i telescopi astronomici, e.g. Dobson). Questo strumento diventerà noto come "telescopio per raggi cosmici". La distanza tra i tubi determina anche l'angolo di cielo inquadrato dal telescopio, più largo se i tubi sono vicini e più stretto se



**Figura 6** - Disegno di Bruno Rossi tratto dal suo libro I RAGGI COSMICI [1]





**Figura 7** - I detectors progettati e realizzati dall'autore e utilizzati nell'esperimento: AMD4 (a), AMD5 (b), AMD6 (c), AMD7 (d), AMD sta per Astroparticle Muon Detector.

si allontanano. Il telescopio viene utilizzato orientando i tubi in direzione Nord-Sud tramite l'ausilio di una bussola e inclinandolo di  $45^\circ$  rispetto al meridiano magnetico, prima verso Est e poi verso Ovest (figura 6). La differenza tra le due misure fornisce l'indicazione di provenienza e quindi il tipo di carica elettrica posseduto dalle particelle primarie.

### ■ I rivelatori utilizzati nelle nostre esperienze

Per ripercorrere le tracce di Bruno Rossi si è voluto provare a fare qualche esperimento analogo al suo, con dei rivelatori a tubi Geiger auto-costruiti denominati AMD4, AMD5, AMD6 e AMD7 (figura 7) da diverse località.

Il rivelatore AMD4 (figura 7a) è stato inizialmente concepito allo scopo di ripetere l'esperimento con cui Victor Hess scoprì i raggi cosmici nel 1912. Nel 2012 infatti in collaborazione con il Gruppo Astronomico Tradatese (GAT) è stato celebrato il centenario dell'inizio della fisica delle astroparticelle tramite una spedizione in mongolfiera (la spedizione VHANESSA) [2,4].

AMD4 è costruito con due tubi GMT (del diametro di 1 cm per 10 di lunghezza) che lavorano in coincidenza e quindi orientandoli allo stesso modo del telescopio di Rossi è possibile fare le misure di direzione. Nella spedizione VHANESSA il rivelatore aveva una geometria che inquadrava un angolo di cielo di circa  $52^\circ$ , per questa esperienza è stato modificato e i tubi sono distanziati di circa 6 cm ottenendo un angolo di visione di circa  $18^\circ$ . L'AMD5 è sostanzialmente identico al precedente, con l'unica differenza di essere costruito all'interno di un case per computer (figura 7b) e nasce come strumento da laboratorio. Questo rivelatore è sistemato presso l'Osservatorio FOAM13 di Tradate dove è permanentemente in funzione ed esegue misure relative al progetto ADA (un progetto didattico volto a rivelare raggi cosmici ultra energetici, gli UHECR). L'AMD6 (figura 7c) invece utilizza due tubi Geiger più grandi (circa 2 cm di diametro per 18 cm di lunghezza) con il vantaggio di avere un conteg-

gio maggiore di particelle rivelate, l'angolo inquadrato dall'AMD6 è di circa  $22^\circ$ . Per finire, l'AMD7 (figura 7d) è stato costruito col fine di essere uno strumento portatile (e.g. per fare misure in alta montagna) ed è equipaggiato con tre GMT che lavorano in modo coincidente; l'angolo di cielo inquadrato dallo strumento è di  $18^\circ$  o  $9^\circ$  a seconda se si utilizzano solo due o tutti i tre tubi Geiger rispettivamente. In questo caso è stato usato con la geometria a  $9^\circ$  per ottenere un risultato estremamente selettivo. La selettività è intesa sia per quanto riguarda la direzione di provenienza, sia per l'energia posseduta dalla particella. Le particelle infatti devono attraversare tutti i tre tubi per essere rivelate, quindi solo particelle sopra ad una certa soglia di energia vengono contate.

I GMT impiegati in questi strumenti hanno dimensioni molto più piccole rispetto a quelli usati da B. Rossi; evidentemente più è grande la superficie che rivela le particelle e maggiori sono i risultati ottenibili. Però c'è un vantaggio rispetto al 1934, grazie ad una porta USB è possibile collegare gli strumenti al computer, così è possibile registrare una quantità infinita di dati ed affidarsi alla statistica.

### ■ I risultati ottenuti

*Nota: Il campionamento dei dati per tutte le prove è di 60 secondi. I dati esposti dove non specificato sono sempre in cpm (count per minute).*

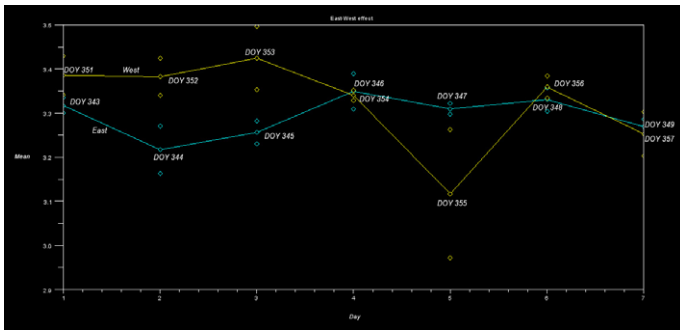
#### **1° test - AMD4 in laboratorio: $45^\circ N$ $8,9^\circ E$ @ 333 m:**

Un primo test che si può considerare preliminare consiste in una serie di dati raccolti in una giornata, prima verso Est e poi verso Ovest.

In questo caso il totale dei campionamenti al giorno è di circa 1440 valori (60 minuti per 24 ore). Il risultato di questa prova purtroppo (e come prevedibile) non ha dato l'esito atteso:

Da EST:  $2,74 \pm 1,67$

Da OVEST:  $2,26 \pm 1,50$



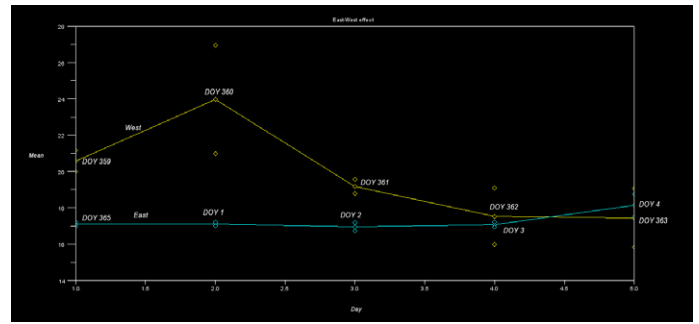
**Figura 8** - Misure Est-Ovest con il rivelatore AMD5: anche se i risultati est-ovest nei grafici sono sovrapposti, non vuol dire che siano stati ottenuti negli stessi giorni, la sovrapposizione è solamente formale, con un solo strumento non è possibile misurare sia quelli da est che quelli da ovest quindi l'approccio è stato di tipo stocastico.

Il flusso di particelle contate è stato addirittura superiore da Est. Il passo successivo più logico è stato quello di aumentare il numero di letture, passando dalle 1440 alle 10.080, il campionamento di una settimana.

**2° test AMD5 - Osservatorio FOAM13: 45,7°N 8,55E @ 350 m:**

Per questo test è stato utilizzato lo strumento AMD5 posizionato all'Osservatorio astronomico di Tradate FOAM13. Il problema dell'analisi dei dati su lunga durata è che bisognerebbe tenere in considerazione parallelamente al flusso di particelle, l'attività solare e la pressione atmosferica le quali possono modulare i muoni atmosferici influenzando i risultati. Questo vale soprattutto se non si ha la possibilità di misurare contemporaneamente sia il flusso da Est che quello da Ovest (come in questo caso), infatti con un solo strumento, tra il rilevamento da Est e quello da Ovest possono trascorrere diversi giorni e quindi la situazione dell'attività solare e atmosferica può cambiare. Per quanto riguarda i valori atmosferici, si è ipotizzato che nel corso di una settimana gli effetti siano trascurabili. L'attività solare è invece stata tenuta sotto costante sorveglianza monitorando l'attività di CELIAS (Charge, Element, and Isotope Analysis System) a bordo della sonda SOHO (<http://umtof.umd.edu/pm/>), e a scopo di verifica è stata fatta una media dei risultati di CELIAS nel periodo considerato. Il confronto col vento solare nei giorni presi in considerazione non fa pensare che esso abbia influito sulle rivelazioni.

Come si vede dal grafico di figura 8, la prevalenza maggiore da ovest non è sempre confermata, alcune volte i valori da Est superano quelli da Ovest, in sostanza non si ha una indicazione certa. Alla fine delle registrazioni si ha:



**Figura 9** - Misure Est-Ovest con il rivelatore AMD6.

Da EST:  $3,29 \pm 0,0274$   
 Da OVEST:  $3,32 \pm 0,0558$

Facendo la percentuale sulla media si ottiene comunque una differenza dello 0.9% con prevalenza di particelle provenienti da Ovest.

**3° test - AMD6 in laboratorio: 45°N 8,9°E @ 333 m:**

Il rivelatore AMD6 utilizza dei GMT che presentano una superficie doppia rispetto a quelli dell'AMD5, la media dei risultati dopo 5 giorni di misure è la seguente:

Da EST:  $17,28 \pm 0,244$   
 Da OVEST:  $19,73 \pm 1,434$

L'asimmetria è stata evidente per alcuni giorni e la differenza percentuale sulla media è del 12,5%, tuttavia nei giorni a seguire si ha un calo (vedi figura 9) e nell'ultima misura quelli da Est ancora una volta superano quelli da Ovest. Anche in questo caso il confronto col vento solare nei giorni presi in considerazione non evidenzia che abbia influito sui dati registrati dal rivelatore.

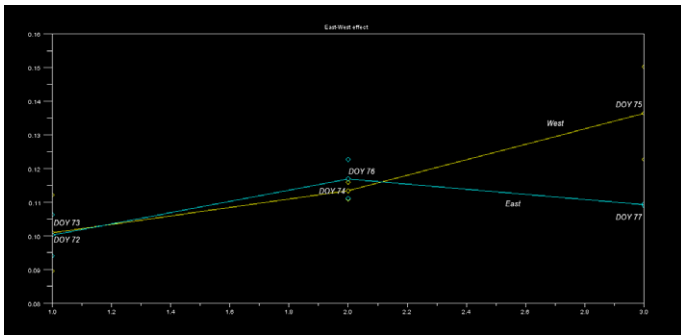
**4° test - AMD7 in laboratorio: 45°N 8,9°E @ 333 m:**

Il rivelatore AMD7 è stato utilizzato per tre giorni (tre giorni puntato verso Est e tre giorni verso Ovest) con tre tubi Geiger in coincidenza e i risultati sono i seguenti:

Da EST:  $0,10879 \pm 0,00404$   
 Da OVEST:  $0,11691 \pm 0,00918$

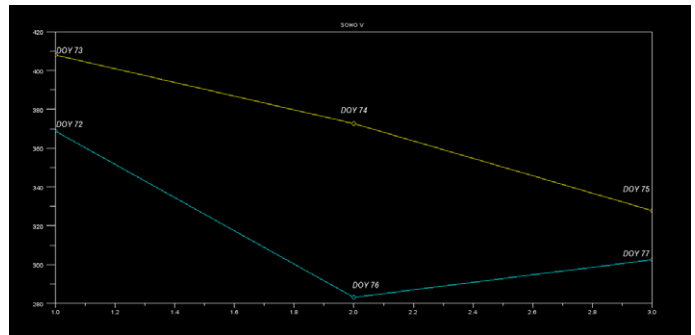
La differenza in questo caso è del 6%, il che fa pensare che l'utilizzo di tre GMT in coincidenza può essere vantaggioso, in quanto il fatto di aver discriminato le particelle più energetiche potrebbe aver prodotto un effetto più evidente.

C'è un problema però, il Sole evidenziava una certa attività nei giorni in cui era in funzione lo strumento.



**Figura 10** - Misure da Ovest (linea gialla) e da Est (linea azzurra) con il rivelatore AMD7.

I dati relativi alla velocità dei protoni del vento solare calano vistosamente dal giorno DOY73 al giorno DOY75 (quasi un effetto Forbush, vedi figura 11) e quindi le misure da Ovest nel primo giorno di misura (DOY73) potrebbero essere state "ostacolate" (almeno in parte) dall'attività prodotta dal Sole, attività testimoniata anche dalla presenza di un bel gruppo di macchie solari (figura 12).



**Figura 11** - Il flusso del vento solare forniti da SOHO nei giorni con misure da Ovest (linea gialla) e da Est (linea azzurra). I valori del vento solare nel giorno DOY73 fanno pensare ad un effetto Forbush (vedi anche figura 10). L'effetto Forbush (Dal fisico americano Scott Forbush) consiste in una rapida diminuzione dei raggi cosmici a terra dovuta all'aumento dell'attività solare. Il campo magnetico del Sole e il vento solare fanno così da scudo verso i raggi cosmici galattici provocando una diminuzione del flusso misurato a terra.



**Figura 12** - Il gruppo di macchie solari nel primo giorno di misura punta proprio dritto verso la Terra (prima immagine a sinistra) con conseguente riduzione del flusso di raggi cosmici misurato dal rivelatore a terra (immagini SOHO).

### ■ Altre misure fuori porta (e un po' più in là)

Durante qualche scampagnata sono state fatte alcune prove della durata di qualche decina di minuti da altitudini differenti, salire in quota dove il flusso di particelle cosmiche aumenta fa aumentare la probabilità di successo dell'esperimento.

#### 5° test - AMD4 Alagna: 45,86°N 7,9E @ 2033 m:

Da EST: 5,875 ±0,125  
Da OVEST: 5,625 ±0,125

I dati di Alagna in Val Sesia, sono ottenuti da una misura di soli 240 valori (4 minuti). Nonostante i 2000

metri di quota, la bassa statistica non mostra distinzione tra i due flussi con un valore più alto di quelli provenienti da Est.

#### 6° test -AMD4 Monte San Giorgio (CH): 45.9°N 8,9E @ 1105 m:

Da EST: 5 ±1,0  
Da OVEST: 6,625 ±0,625

Il numero di rilevamenti in Svizzera è stato lo stesso di Alagna, ma il risultato mostra una prevalenza di raggi cosmici da Ovest. Se considerassimo per buona questa misura avremmo un'asimmetria del 24,5%, ma la statistica è quasi nulla.



## 7° test -AMD4 Tenerife, Isole Canarie (SP):

Prove in Hotel 28°N -16.6E, @ 20 m

I valori presi alle Canarie a livello del mare sono ottenuti da una serie di 5 campionamenti da 4 minuti ognuno:

Da EST:  $3,95 \pm 0,69$

Da OVEST:  $4,55 \pm 0,9$

Nonostante il flusso da Ovest sia evidente (13%), altre misure di qualche ora avevano mostrato risultati meno attendibili.

## 8° test dal parco del Teide, Tenerife (Sp) 28,19°N -16,67E @ 2100 m:

Da EST:  $4,12 \pm 0,87$

Da OVEST:  $5,25 \pm 0,01$

La misura ricavata dal parco del Teide (figura 13) oltre i 2000 metri è tutt'altra cosa, la media è sempre tratta da una serie di misure di 4 minuti, ma il fatto interessante è che a questa altitudine ogni misura ha dato sempre risultati maggiori da Ovest rispetto a quelli da Est (potremmo dire sigma 5!). In totale l'asimmetria risulta essere del 21,52%.

### ■ Considerazioni finali

Alle nostre latitudini (45° N) l'asimmetria non è evidente ma si è visto che utilizzando una discreta superficie di rivelazione e molta statistica si ottiene un valore misurabile, è stato interessante anche notare che l'utilizzo di tre tubi in coincidenza anziché due, aumenta la probabilità di evidenziare l'effetto per via della selettività sul momento della particella. In base



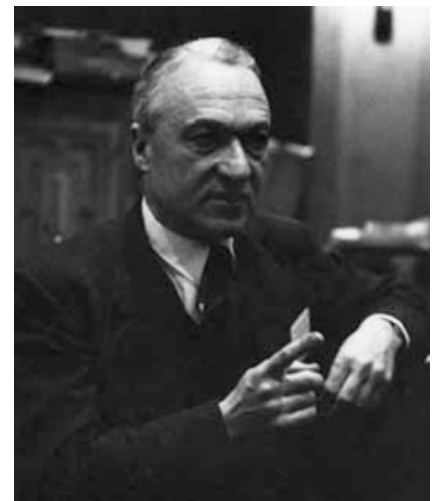
**Figura 13** - Misure Est-Ovest al parco del Teide (Canarie) con il rivelatore AMD4.

a queste esperienze sarà in seguito possibile realizzare un esperimento di lunga durata con due rivelatori in funzione contemporaneamente. In questo modo sarà più semplice calcolare gli effetti della pressione atmosferica e del vento solare sui rilevamenti dei raggi cosmici.

Finora alle nostre latitudini, e in queste prove, si è visto che il rapporto tra l'intensità dei raggi cosmici da Ovest rispetto a quella da Est varia da 1 a 6 punti percentuali.

A 28° N (Canarie) abbiamo osservato che l'asimmetria non è sempre evidente a livello del mare ma è invece certa sopra i 2000 m di quota, con un rapporto di 1.27 per i raggi cosmici provenienti da Ovest rispetto a quelli provenienti da Est e differenza del 21.52% .

I dati sono estremamente concordi con quelli di Bruno Rossi (figura 14) che esattamente ottant'anni fa dall'Asmara (in Eritrea 11° N geomagnetico) aveva ottenuto un'asimmetria del 26% a 2370 m di quota [1]. ■



**Figura 14** - Bruno Benedetto Rossi, il padre della fisica dei raggi cosmici in Italia (Fonte immagine: Luisa Bonolis, [www.luisabonolis.it](http://www.luisabonolis.it))



Bibliografia:

- [1] Bruno Rossi, *I Raggi Cosmici*, Einaudi 1962.
- [2] Marco Arcani - *Astroparticelle, in viaggio tra i Raggi Cosmici* - Simple 2013.
- [3] Christopher J. Mertens et al. - *Influence of Space Weather on Aircraft Ionizing Radiation Exposure* - 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 7 - 10 January 2008, Reno, Nevada.
- [4] Marco Arcani, Cesare Guaita, Antonio Paganoni, VHANESSA expedition, *Astroparticle Physics*, Volume 53, January 2014, Pages 100-106, ISSN 0927-6505, <http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.03.005> - Elsevier.
- [5] Peter K.F. Grieder - *COSMIC RAYS AT EARTH Researcher's Reference Manual and Data Book* - Elsevier 2001.